

10/525 612**DT15 Rec'd PCT/PTO 24 FEB 2005**

Beschreibung

Verfahren zur Ermittlung des Signal-Rausch-Verhältnisses
eines optischen Signals ohne vorherige Demultiplexierung

5

Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung zur
Ermittlung des Signal-Rausch-Verhältnisses (OSNR) eines
optischen Signals nach den Oberbegriffen der Patentansprüche
1 und 9.

10

Die mit Hilfe von Wellenlängen-Multiplex(-WDM)-
Übertragungssystemen überbrückbare Übertragungsreichweite
eines WDM-Signals mit mehreren Kanälen wird unter anderem
durch die in optischen Verstärkern entstehende verstärkte
spontane Emission ASE, "amplified spontaneous emission", als
Rauschleistung begrenzt, die sich den optischen Signalen bei
den Kanälen überlagert. Zur optimalen Einregelung der
Übertragungseigenschaften muss diese Rauschleistung gemessen
werden.

20

Üblicherweise wird die in einem gewissen Wellenlängenabstand
zu einem Kanal auftretende Rauschleistung ASE bei kleineren
und größeren Wellenlängen gemessen und die dem Kanal
überlagerte Rauschleistung ASE durch Interpolation berechnet.
Infolge der starken Zunahme der Anzahl an Wellenlängenkanälen
und der damit einhergehenden Abnahme des Kanalabstands kann
dieses Verfahren nicht mehr eingesetzt werden. Auch die in
modernen Übertragungssystemen innerhalb der Strecke
eingesetzten Komponenten zur Beeinflussung des Spektrums und
zum Ein- bzw. Auskoppeln von Signalen verbieten den Einsatz
dieses Verfahrens. In solchen Übertragungssystemen sollte
deshalb ein Verfahren zum Einsatz kommen, das direkt die
Messung der den Kanälen überlagerten Rauschleistung ASE
zulässt.

35

Als Abhilfe wurde ein als "Polarization Nulling" bezeichnetes
Verfahren vorgeschlagen, das davon Gebrauch macht, dass der
aus der Rauschkomponente ASE resultierende Signalanteil

nicht polarisiert ist. Der wesentliche Nachteil aller bisher bekannten Realisierungsvorschläge dieses Verfahrens ist jedoch, dass durch spektrale Filterung jeder Kanal einzeln selektiert und mit Hilfe eines Polarisationsstellers ein
5 definierter Polarisationszustand zur optimalen Unterdrückung des polarisierten Signalanteils eingestellt werden muss. Dadurch wird dieses Verfahren sehr aufwendig und führt zu langen Messzeiten. Die beiden folgenden Schriften beschreiben die Grundlagen der Methode: "OSNR Monitoring
10 Technique Based on Polarisation Nulling Method", J.H. Lee, D.K. Jung, C.H. Kim, Y.C. Chung, IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 13, No.1, January 2001; "Improved OSNR Monitoring Technique Based on Polarisation Nulling Method", J.H. Lee, Y.C. Chung, Electronics Letters, 19th July 2001,
15 Vol. 37, No. 15.

In DE 10049769 A1 sind ebenfalls eine Vorrichtung und ein Verfahren zum Messen des optischen Signal-Rausch-Verhältnisses (OSNR) angegeben, wobei ausgenutzt wird, dass
20 der Signalanteil im Gegensatz zum Rauschanteil linear polarisiert ist. Hinter einem variablen optischen Bandpassfilter (VOPBF) wird das zuvor verstärkte Eingangssignal in vier Teilkomponenten aufgeteilt und die Stokesschen Parameter werden bestimmt. Eine Recheneinrichtung
25 berechnet sowohl die Leistung des polarisierten Eingangssignals, als auch die Rauschleistung. Zueinander ins Verhältnis gesetzt wird die OSNR bestimmt. Die Vorrichtung misst die OSNR für den gesamten Spektralbereich, indem die Durchlasswellenlänge des VOPBF, angefangen bei den kleineren
30 Wellenlängen, sequenziell verändert wird und aus den gemessenen Leistungswerten der Spitzenwert für die Signalleistung bestimmt wird. Auch bei diesem Verfahren ist der gerätetechnische Aufwand durch die notwendige Rechen- und Auswerteeinheit in Verbindung mit der Filtereinheit hoch.

35 In "Optical Signal-To-Noise Ratio Measurement In WDM Networks Using Polarization Extinction", M. Rasztovits-Wiech et al., ECOC 98, 20-24 Sept., Madrid, p. 549-550 wird eine Anordnung

zur Messung der Signal-Rauschabstände vorgestellt, bei der ein WDM-Signal in einen Polarisationssteller, weiterhin in einen linearen Polarisator und anschließend in einen optischen Spektrumanalysator oder in ein Leistungsmessmodul mit vorgeschaltetem abstimmbaren optischen Filter eingespeist wird. Das abstimmbare Filter wird so eingestellt, dass die Leistung eines einzelnen Kanals vollständig transmittiert wird und der restliche Anteil des WDM Spektrums unterdrückt wird. Der Polarisationssteller wird so lange verstellt, bis das Leistungsmessgerät ein minimales Signal anzeigt. Danach wird der Polarisator in die dazu orthogonale Position gebracht, so dass das Leistungsmessmodul einen maximalen Wert anzeigt. Aus der Differenz zwischen maximalem Signal und dem um 3dB erhöhten minimalen Signal ergibt sich der Signal-Rauschabstand OSNR bezogen auf die Bandbreite des abstimmbaren Filters. Ein Nachteil dieser Methode ist der hohe Zeitaufwand bei einer Messung für sehr viele WDM-Kanäle,

da alle Kanäle sequentiell unabhängig wie oben beschrieben vermessen werden müssen.

- Ein weiteres Verfahren besteht darin, mit Hilfe eines
- 5 Polarisations-Verwüflers, "Polarization-Scramblers",
sämtliche Polarisationszustände auf der Poincaré-Kugel
abzufahren und für jeden eingestellten Polarisationszustand
ein zugehöriges Spektrum mit Hilfe eines optischen
10 Spektrumanalysators aufzunehmen. Die aus der Analyse aller
aufgenommenen Spektren ermittelte minimale und maximale
Leistung wird dann zur Berechnung des Signal-Rauschabstands
OSNR verwendet. Die minimale Leistung tritt genau dann auf,
wenn das Signal vollständig durch den Polarisator unterdrückt
15 Signalleistung zuzüglich der Rauschleistung ASE gemessen
wird.

- In US 2001/0052981 A1 ist eine Methode zur Messung des
Signal-Rausch-Verhältnisses eines optischen Signals
- 20 angegeben, die ein Standard-Vorgehen von „Polarisation-
Nulling“ darstellt. Dabei werden als Stellgrößen die
Drehwinkel zwischen einer Lambda/4-Platte und einem
Polarisator mittels einer Regelung eingestellt. Ein
wesentlicher Nachteil ist, dass zunächst ein bestimmter
- 25 Polarisationszustand am Eingang des Polarisators eingestellt
werden muss. Nachdem der Polarisator verstellt wird, werden
aus den Messergebnissen das Minimum und das Maximum des
optischen Signals ermittelt. Da zur Messung der Signal-
Rauschabstände bzw. zur Erzielung eines bzw. zweier
- 30 gewünschten Polarisationszustände eine Regelung für eine
360°-Drehung des Polarisators erforderlich ist, weist diese
Methode eine nachteilige Redundanz von Messungen auf, die mit
Zeitaufwand verbunden ist.
- 35 In der Praxis ist es natürlich nicht möglich, sämtliche
Polarisationszustände abzufahren. Je nach Zahl der gewählten
Zustände und der Geschwindigkeit, mit der sich der

Polarisationszustand eines Kanals im Übertragungssystem verändert, verbleibt ein mehr oder weniger großer Messfehler.

- Aufgabe der Erfindung ist es, ein Verfahren und eine
- 5 Vorrichtung anzugeben, mit denen das Signal-Rausch-Verhältnis eines optischen Signals auf der Basis des "Polarization Nulling" mit minimalem Aufwand, möglichst großer Genauigkeit und möglichst schnell ermittelt werden. Besondere Vorteile sollte das Verfahren bei der Analyse von optischen
- 10 Wellenlängen-Multiplex-(WDM) Signalen bieten.

- Eine Lösung der Aufgabe erfolgt hinsichtlich ihres Verfahrensaspekts durch ein Verfahren mit den Merkmalen des Patentanspruchs 1 und hinsichtlich ihres Vorrichtungsaspekts
- 15 durch eine Vorrichtung mit den Merkmalen des Patentanspruchs 8.

Kanäle gewonnen werden, indem das gesamte WDM-Spektrum, das alle Kanäle umfasst, aufgenommen wird. Dadurch wird die Messzeit unabhängig von der Anzahl der Kanäle.

Vorteilhafte Weiterbildungen der Erfindung sind in den
5 Unteransprüchen angegeben.

Ein Ausführungsbeispiel der Erfindung wird im Folgenden anhand der Zeichnung näher erläutert.

10 Dabei zeigt:

Fig. 1: eine Vorrichtung zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens.

15 Zur einfacheren Darstellung des erfindungsgemäßen Verfahrens wird eine Vorrichtung gemäß Fig. 1 so gewählt, dass ein WDM-Signal S zunächst einem Polarisationssteller PS, bestehend aus einer $\lambda/4$ -Platte E1 und einer $\lambda/2$ -Platte E2 als Phasenverzögerungsplatten, zugeführt wird. Dem
20 Polarisationssteller PS ist ein Polarisator POL nachgeschaltet. Für verschiedene Einstellungen des Polarisators bzw. des aus dem Polarisationsstellers durchgelassenen Polarisationszustandes wird nun mittels eines optischen Spektrumanalysators OSA jeweils die spektrale
25 Leistungsdichte am Ausgang dieser Vorrichtung aufgezeichnet. Dem optischen Spektrumanalysator OSA kann ein Wellenlängen-Demultiplexer oder ein wellenlängen-selektives Filter vorgeschaltet werden, so dass gewählte Kanäle oder nur ein Kanal des WDM-Signals aufgenommen werden/wird. Eine
30 Demultiplexierung ist jedoch in der Praxis nicht notwendig. Dem optischen Spektrumanalysator OSA ist eine Ermittlungseinheit EE des Signal-Rauschabstandes OSNR zugeschaltet, bei der eine Interpolation und eine Hubsuche der am optischen Spektrumanalysator OSA aufgenommenen
35 Amplitudenwerten zur erfindungsgemäßen Ermittlung des gemessenen Signal-Rauschabstandes OSNR durchgeführt werden. Die Ermittlungseinheit EE steuert eine Drehvorrichtung DV der

Der Einfluss von optischen Komponenten auf die Polarisation einer ebenen Welle lässt sich durch Jones-Matrizen beschreiben, die die Jones-Vektoren in Form einer linearen Abbildung transformieren. Matrixdarstellungen sind immer mit der Wahl einer speziellen Basis verknüpft. Das bedeutet, dass mit Angabe einer Matrix die Lage der Koordinatenachsen fixiert wird. In diesem Ausführungsbeispiel erfährt die x-Komponente der dem linearen Polarisator POL eingehenden Welle eine maximale Transmission und die y-Komponente dieser Welle wird vollständig unterdrückt.

Die Jones-Matrix der $\lambda/4$ -Platte, deren schnelle Achse mit der x-Achse den Winkel δ bildet, lässt sich wie folgt darstellen:

15

$$M_{N4} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 + i \cdot \cos 2\delta & i \cdot \sin 2\delta \\ \sin 2\delta & 1 - i \cdot \cos 2\delta \end{pmatrix}.$$

Die Jones-Matrix der $\lambda/2$ -Platte lautet:

20

$$M_{N2} = i \begin{pmatrix} \cos 2\theta & \sin 2\theta \\ \sin 2\theta & -\cos 2\theta \end{pmatrix},$$

wobei θ den Winkel zwischen der schnellen Achse dieser Platte mit der x-Achse bezeichnet.

Im Folgenden soll die in Figur 1 abgebildete Vorrichtung mit Hilfe dieser Theorie betrachtet werden. Die Anordnung aus der $\lambda/4$ -Platte und der $\lambda/2$ -Platte wird durch die folgende Matrix beschrieben, wobei die Elemente in der zweiten Zeile mit Absicht nicht dargestellt sind, da sie nur die vom Polarisator POL unterdrückte y-Komponente des elektrischen Feldes \vec{E} beeinflussen:

$$M = M_{N2} \cdot M_{N4} = \frac{i}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \cos 2\theta + i \cdot \cos(2\theta - 2\delta) & \sin 2\theta - i \cdot \sin(2\theta - 2\delta) \\ \dots & \dots \end{pmatrix}$$

$$A^2 = 4 \cdot \left[\left\{ q^2 - 1/2 \right\} \cdot \cos 2\delta + q \cdot \sqrt{1 - q^2} \cdot \cos \Delta\varphi \cdot \cos 2\delta \right]^2 + \left\{ q \cdot \sqrt{1 - q^2} \cdot \sin \Delta\varphi \right\}^2$$

5 oder

$$A^2 = 4 \cdot \left[\frac{1}{2} \left\{ q^2 - 1/2 \right\}^2 + q^2 \cdot (1 - q^2) \cdot (1 + \sin^2 \Delta\varphi) \right. \\ \left. + \frac{1}{2} \left\{ q^2 - 1/2 \right\}^2 - q^2 \cdot (1 - q^2) \cdot \cos^2 \Delta\varphi \right] \cdot \cos^2 4\delta \\ + (q^2 - 1/2) \cdot q \cdot \sqrt{1 - q^2} \cdot \cos \Delta\varphi \cdot \sin 4\delta$$

Diese Größe zeigt wiederum eine sinusförmige Abhängigkeit vom Winkel δ . Für das dargestellte Verfahren ist von Bedeutung,
15 dass das Maximum dieser Größe - unabhängig von q und $\Delta\varphi$ - immer 1 beträgt und damit die Signalleistung angibt.

Zusammengefasst basiert die Erfindung auf der Erkenntnis, dass sich die durch den Polarisator POL transmittierte und
20 gemessene Leistung I als einfache trigonometrische Funktion in Abhängigkeit von den beiden Stellwinkeln θ und δ der $\lambda/2$ -Platte, bzw. $\lambda/4$ -Platte beschreiben lässt.

Die gemessene Leistung I am optischen Spektrumanalysator OSA
25 wird für einige definierte Einstellungen der Platten E1 und E2 z. B. in einer zwei-dimensionalen Tabelle in Abhängigkeit von den Stellgrößen δ und θ gespeichert. Im Folgenden werden die einzelnen Verfahrensschritte im Detail beschrieben. Zur einfacheren Darstellung wird das Verfahren zunächst für einen
30 einzigen Kanal behandelt. Danach wird erläutert, wie der Signal-Rauschabstand OSNR sämtlicher Kanäle z. B. in einem WDM-System gleichzeitig bestimmt werden kann. Diese Methode eignet sich vorzugsweise für beliebige optische Multiplex-Signale vor der Demultiplexierung.

- 1) Bei einer festen Einstellung der $\lambda/4$ -Platte E1 z. B. bei einem Winkel δ_1 wird die Leistung des Kanals nach dem Polarisator POL für n ($n = 1, 2, \dots, N$) verschiedene Einstellungen d.h. für n Winkel $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N$ der $\lambda/2$ -Platte E2 als Satz oder Spektrum S_{δ_1} von Leistungswerten aufgenommen.
- 2) Für jede beliebig fest gewählte Stellung der $\lambda/4$ -Platte E1 bei weiteren Winkeln $\delta_2, \dots, \delta_M$ ($m = 2, \dots, (M-1)$) und zeitlich konstanter Polarisation der einfallenden Lichtwelle, gilt die sinusförmige Abhängigkeit zwischen der gemessenen Leistung I nach dem Polarisator POL und dem Winkel θ der schnellen Achse der $\lambda/2$ -Platte E2 zum Polarisator POL. Das Maximum sowie das Minimum dieser Kurve sind abhängig von der Stellung der $\lambda/4$ -Platte E1 und werden im Folgenden als I_{\max} bzw. I_{\min} bezeichnet.
- 3) Die Leistungen I_{\max} und I_{\min} werden aus den Messungen für mehrere Stellungen der $\lambda/2$ -Platte E2 durch einen geeigneten Kurvenfit an die Sinuskurve ermittelt und gespeichert. Ein von den Leistungen I_{\max} und I_{\min} entsprechender Hub A_1 wird dabei auch gespeichert.
- 4) Die Schritte (1) bis (3) werden im folgenden für verschiedene Stellungen der $\lambda/4$ -Platte E1 (Anzahl m , $m > 1$) wiederholt. Es werden damit M Werte für I_{\max} und I_{\min} ermittelt und gespeichert. Weitere von den Leistungen I_{\max} und I_{\min} entsprechenden Hübe A_2, A_3, \dots, A_M werden dabei auch gespeichert.
- 5) Trägt man nun für die m Stellungen der $\lambda/4$ -Platte das Quadrat der Differenz $I_{\max} - I_{\min}$ über dem Winkel δ auf, so kann der maximale Wert für $(I_{\max} - I_{\min})^2$ durch einen geeigneten Fit an die sinusförmige Kurve ermittelt werden.
- 6) Das dabei auftretende Maximum entspricht der Signalleistung. Da die Summe aus Signalleistung und Rauschleistung durch eine Leistungsmessung am Eingang der

Vorrichtung bekannt ist, kann durch Subtraktion die Rauschleistung und somit auch das Signal-Rauschverhältnis OSNR bestimmt werden.

- 5 Das Vorgehen für ein WDM-Signal, das aus einer Vielzahl optischer Signale verschiedener Wellenlänge zusammengesetzt ist, liegt nun auf der Hand. Anstelle der Leistung nur eines Kanals wird für jede Kombination der Stellungen der beiden doppelbrechenden Platten E1, E2 ein Leistungsspektrum LS
- 10 aufgenommen, so dass jeweils die Leistungen aller Kanäle nach dem Polarisator POL ermittelt werden. Die Auswertung durch Interpolation der sinusförmigen Kurven kann nun wie zuvor für jeden Kanal separat erfolgen.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Ermittlung des Signal-Rausch-Verhältnisses (OSNR) von beliebig polarisierten optischen Signalen (S) unterschiedlicher Wellenlänge, die zu einem WDM-Signal zusammengefasst sind,
5 nach einem „Polarisation-Nulling-Verfahren“,
dadurch gekennzeichnet,
dass Leistungsspektren (LS) des WDM-Signals
10 für eine erste festgelegte Einstellung $m = 1$ ($m = 1, 2, \dots M$) eines ersten polarisationsoptischen Phasenstellers (E1) und für N ($n = 1, 2, \dots N$) Einstellungen eines zweiten polarisationsoptischen Phasenstellers (E2) aufgenommen und gespeichert werden,
15 dass aus den Leistungsspektren (LS) für die optischen Signale (S) ein maximaler Hub (A_1) ermittelt und gespeichert wird,
dass anschließend die Leistungsspektren (LS) des WDM-Signals für $(M-1)$ Neueinstellungen des ersten Phasenstellers (E1) und für jeweils N Einstellungen des zweiten Phasenstellers (E2)
20 aufgenommen und gespeichert werden,
dass aus diesen gespeicherten Leistungsspektren (LS) für jede Einstellung des ersten Phasenstellers (E1) die maximalen Hübe (A_m) mit $m = 1, 2, \dots (M-1)$ der Signale ermittelt und gespeichert werden, und
25 dass anhand aller Hübe ($A_1, A_2, \dots A_M$) für die optischen Signale (S) das Signal-Rausch-Verhältnis (OSNR) berechnet wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1,
30 dadurch gekennzeichnet,
dass der Hub (A_m) ($i=1, 2, \dots M$) eines optischen Signals (S) mittels einer Interpolation ermittelt wird.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2,
35 dadurch gekennzeichnet,
dass mittels Interpolation der quadrierten Hübe die Signalleistung des optischen Signals (S) ermittelt wird.

4. Verfahren nach Anspruch 1, 2 oder 3,
dadurch gekennzeichnet,
dass mittels einer Leistungsmessung am Eingang der
Polarisationssteller eine Summe der Signal- und
- 5 Rauschleistung ermittelt wird, aus der eine Rauschleistung
durch Subtraktion von der ermittelten Signalleistung des
optischen Signals (S) ermittelt wird.
5. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche,
10 dadurch gekennzeichnet,
dass die Anzahl der Einstellungen des Polarisationsstellers
minimal je nach einem festgesetzten Verhältnis zwischen
Genauigkeitsermittlung des Signal-Rauschabstandes (OSNR) und
Messzeit gewählt wird.
- 15 6. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet,
dass die Phasenverschiebungen zwischen den Komponenten des
elektrischen Feldvektors eines optischen Signals (S) und dem
20 Polarisator (POL) mittels Phasenverzögerungsplatten als
polarisationsoptische Phasensteller vorgenommen werden, und
die Phasenverzögerungsplatte (E1) mit den Drehwinkeln (δ_1 ,
 δ_2 , ... δ_M) einstellbar ist und die Phasenverzögerungsplatte
(E2) mit den Drehwinkeln (θ_1 , θ_2 , ..., θ_N) einstellbar ist.
- 25 7. Verfahren nach Anspruch 6,
dadurch gekennzeichnet,
dass die Einstellungen der ersten und zweiten
Phasenverzögerungsplatten (E1) und (E2) so erfolgen,
30 dass eine erste Phasenverschiebung für einen ersten
Drehwinkel (δ_1) von (E1) eingestellt wird und eine Vielzahl N
von Winkeln (θ_1 , θ_2 , ... θ_N) für (E2) eingestellt wird, aus
denen ein Satz von N Leistungswerten aufgenommen wird,
dass aus diesen Leistungswerten eine erste sinusförmige
35 Interpolationskurve ermittelt wird, deren Hub (A_1) in einer
Tabelle gespeichert wird,
dass die Einstellungen der Winkel (θ_1 , θ_2 , ... θ_N) bei
weiteren Drehwinkeln (δ_2 , ... , δ_M) mit $m > 1$ zur Aufnahme von

- weiteren Leistungswerten wiederholt werden, aus denen weitere Hübe ($A_2, \dots A_M$) gespeichert werden, deren Werte quadriert und mit einer weiteren sinusförmigen Kurve (SIN) in Abhängigkeit von ($\delta_1, \delta_2, \dots \delta_M$) interpoliert werden,
- 5 dass die Signalleistung des optischen Signals aus dem Hub der sinusförmigen Kurve (SIN) ermittelt wird, wodurch für die optischen Signale (S) das Signal-Rausch-Verhältnis (OSNR) abgeleitet wird.
- 10 8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass zur Aufnahme der Leistungswerte eines optischen Signals (S) eine Auflösungszelle mit einer Bandbreite gleich oder kleiner als die spektrale Breite eines Kanals eines WDM-
- 15 Signals gewählt wird.
9. Vorrichtung zur Ermittlung des Signal-Rausch-Verhältnisses (OSNR) von beliebig polarisierten optischen Signalen (S) unterschiedlicher Wellenlänge, die zu einem WDM-Signal
- 20 zusammengefasst sind, nach einem „Polarisation-Nulling-Verfahren“, bei dem nach Durchgang durch einen ersten und einen zweiten polarisationsoptischen Phasensteller (E1, E2) das optische Signal (S) in einen linearen Polarisator (POL) mit
- 25 nachgeschaltetem optischen Spektrumanalysator (OSA) eingespeist ist, dadurch gekennzeichnet, dass dem optischen Spektrumanalysator (OSA) eine Speichereinheit (SE) zur Tabellierung von den am optischen
- 30 Spektrumanalysator (OSA) gemessenen Leistungswerten der Spektren bei unterschiedlichen Einstellungen der Phasensteller (E1, E2) angefügt ist, und dass dem optischen Spektrumanalysator (OSA) eine Ermittlungseinheit (EE) zur Berechnung des Signal-Rausch-
- 35 Verhältnisses (OSNR) durch Interpolation und Hubsuche der am optischen Spektrumanalysator (OSA) aufgenommenen Leistungswerte angeschlossen ist.

10. Vorrichtung nach Anspruch 9,
dadurch gekennzeichnet,
dass der erste polarisationsoptische Phasensteller (E1) eine
 $\lambda/4$ -Platte und der zweite polarisationsoptische Phasensteller
5 (E2) eine $\lambda/2$ -Platte ist.